

# FEM-Simulation induktiv angeregter Thermografie

Matthias NOETHEN\*, Yi JIA\*\* und Norbert MEYENDORF\*,  
\* Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren, Institutsteil Dresden,  
Maria-Reiche-Straße 2, 01109 Dresden,  
matthias.noethen@izfp-d.fraunhofer.de  
\*\* University of Puerto Rico, Mayaguez, USA

**Kurzfassung.** Die induktiv angeregte Thermografie ist besonders für Fertigungsprozesse geeignet, in denen der Prüfkörper zu 100% berührungslos geprüft werden muss. Das Werkstück wird bei diesem Verfahren kurzzeitig induktiv erwärmt und die resultierende Temperaturverteilung an der Oberfläche des Bauteils mit einer Infrarotkamera aufgenommen. In der Umgebung von Rissen werden die induzierten Wirbelströme an ihrer homogenen Ausbreitung nahe der Oberfläche gehindert. Dies führt zu einer erhöhten Stromdichte im Bereich des Risses. Daraus resultiert eine höhere Temperatur des Materials in der Umgebung des Risses im Vergleich zur übrigen Oberfläche. Die Defekte können somit defektselektiv erkannt werden.

Um eine schnelle Aussage über verschiedene Vorgänge treffen zu können, ist es in der Industrie heutzutage üblich, statt einer aufwändigen und zeitintensiven Versuchsdurchführung, eine schnelle Berechnung bzw. eine Simulation beispielsweise eines Produktionsvorgangs durchzuführen.

Es wurde ein Simulationstool entwickelt, das die Anwendung der induktiv angeregten Thermografie zur Oberflächenrissprüfung in metallischen Werkstoffen modelliert. Die Simulation ermöglicht die Betrachtung von verschiedenen Fehlerarten in nahezu jedem elektrisch leitenden Material. Um einen Induktionsvorgang zu simulieren, sind zwei unabhängige Simulationen notwendig, die in einer Multifieldsimulationsumgebung miteinander gekoppelt sind und die elektromagnetischen und thermischen Vorgänge berechnen.

Basis für diese Multifield-Simulation stellt die CAE-Software Ansys dar. Auf dieser Grundlage ist es möglich die Verteilung der induzierten Wirbelströme und der daraus resultierenden Temperaturverteilung zu betrachten. Des Weiteren ermöglicht die Simulation die Anpassung und Optimierung des modellierten Prüfprozesses.

Es wird anhand von geeigneten Beispielen gezeigt, dass die Simulationsergebnisse als zuverlässiges Hilfsmittel zur Einschätzung von Prüfvorgängen verwendet werden können. Außerdem können für verschiedene Materialfehler charakteristische Temperaturverteilungen berechnet werden.

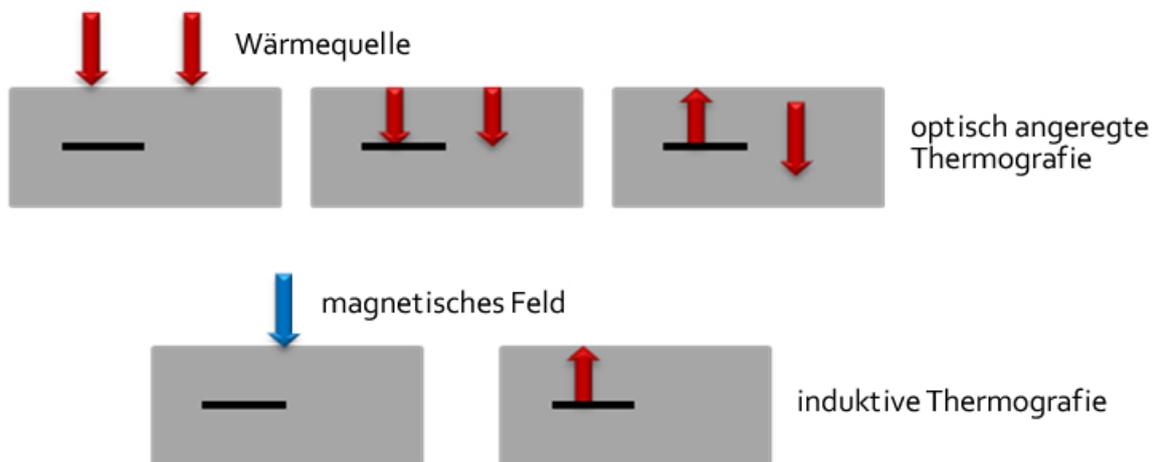
## Einführung

Für viele Systeme mit sicherheitsrelevanten Funktionen werden zunehmend qualitativ hochwertigste Stahlprodukte verwendet. Beispielsweise werden Stahlprodukte für U-Boote und Stahlseile für Seilbahnen speziell geprüft um ein Höchstmaß an Qualität und Sicherheit gewährleisten zu können. Um diese hohe Produktqualität einem Kunden garantieren zu können, wird jedes Bauteil auf Fehler überprüft. Ein gesondertes Augenmerk liegt seit einiger Zeit auf der Detektion von Oberflächenrissen. Diese Risse haben einen sehr großen Einfluss auf die Langzeitstabilität. Während des Einsatzes des Stahlproduktes wird dieses zyklisch beansprucht, wodurch die oberflächennahen Fehler wachsen können. Dieser

Mechanismus führt langfristig zum Versagen des Bauteils. Weiterhin haben Bauteile mit Oberflächenrissen eine größere Oberfläche und bieten dadurch eine größere chemische Angriffsfläche. Um 100% der hergestellten Produkte prüfen zu können, werden die Prüfeinrichtungen in den Produktionsablauf integriert. Bedingt durch die kurzen Taktzeiten durchlaufen die Prüfteile die Prüfeinheit mit 1 m/s - 3 m/s. Allein aufgrund dieser hohen Prüfgeschwindigkeit können nur kontaktlose Prüfverfahren eingesetzt werden.

Die induktiv angeregte Thermografie bietet eine Alternative zu der sehr zeitaufwändigen Magnetpulverprüfung oder der Wirbelstromprüfung, bei der die Sensoren sehr nah über der Oberfläche bewegt werden müssen. Bei der thermografischen Prüfung befindet sich die Infrarotkamera in einem Abstand von 30 cm bis 60 cm senkrecht über der zu prüfenden Oberfläche nachdem die Testobjekte den Induktor passiert haben. Die induzierten Wirbelströme verursachen durch den Widerstand des Materials eine lokale Erwärmung. Mit dem infrarotempfindlichen Bildgebungssystem wird die emittierte Infrarotstrahlung der Bauteiloberfläche detektiert. Erkennbare Anomalien der Temperaturverteilung der Oberfläche sind mit Inhomogenitäten im Material verbunden.

Ein ähnliches kontaktloses Prüfverfahren zur Prüfung von Bauteilen stellt die optisch angeregte Thermografie dar. Risse können mit diesem Verfahren durch Anregung mit einem Laser detektiert werden. Verglichen mit der induktiven Anregung hat die optische Anregung den entscheidenden Nachteil, dass die thermische Welle zuerst von der Bauteiloberfläche ausgehend das Material durchläuft und an Fehlstellen reflektiert wird. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 1 grafisch dargestellt. Wie hieraus ersichtlich ist, ist der bei optischer Anregung von der thermischen Welle zurückgelegte Weg doppelt so lang wie der bei induktiver Anregung. Somit ist auch die Zeitdauer, bis die thermische Antwort an der Oberfläche zu erkennen ist, stark unterschiedlich.



**Abbildung 1:** Vergleich der optisch und induktiv angeregten Thermografie

Der Vorteil der induktiven Thermografie bei der zerstörungsfreien Prüfung von Oberflächen liegt darin, dass die Wärmeentwicklung in der direkten Umgebung des Risses auftritt. Die thermische Information der Oberfläche ist somit defektselektiv und kann mit einer Dunkelfeldmethode verglichen werden. Diese Methode zur Oberflächenrissprüfung ist sehr viel schneller und einfacher zu handhaben. Beispielsweise werden zur Prüfung keine Kontaktmittel benötigt, die die Oberfläche verschmutzen. Demzufolge ist dieses Verfahren besonders für schnelle Prüfungen während des Produktionsvorgangs geeignet.

Eine weitere anwendbare Prüfmethode zur Detektion von Oberflächenrissen ist die Wirbelstromprüfung. Hierbei werden Wirbelströme sehr viel geringerer Leistung in das Bauteil induziert und die magnetische Antwort mit einer Empfängerspule detektiert. Da dieses Prüfsystem bislang nur als Einzeldetektor kommerziell verfügbar ist, für eine

schnelle flächige Prüfung jedoch mindestens Zeilendetektoren benötigt werden, findet dieses Messsystem nur in speziellen Fällen Anwendung. Zusätzlich müssen die Feld- und Detektorspule so nah wie möglich über die Oberfläche bewegt werden. Um Beschädigungen an der Messeinrichtung zu verhindern, muss der Detektor aktiv über der Oberfläche positioniert werden.

### Komponenten der induktiven Thermografieprüfung

Bei der induktiv thermischen Prüfung werden Wirbelströme hoher Intensität in das zu prüfende Bauteil induziert und die thermische Antwort aufgenommen und ausgewertet. Die fehlerhaften Bereiche werden durch die höhere Stromdichte stärker erwärmt. Mit einer speziellen Software kann die detektierte thermische Strahlung ausgewertet werden. Alle hierfür notwendigen Komponenten sind in Abbildung 2 dargestellt.

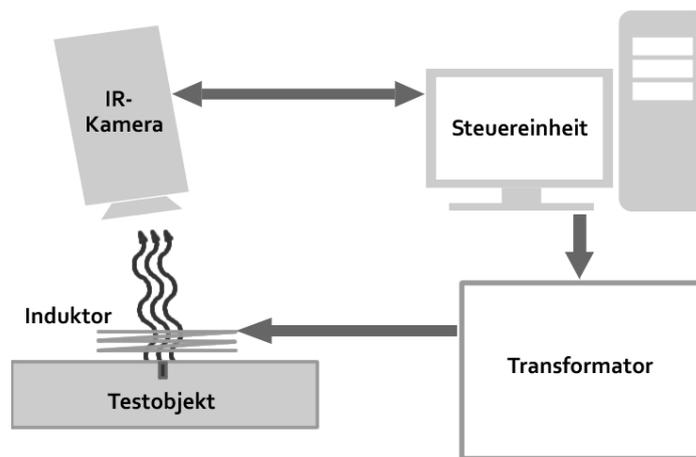


Abbildung 2: Für die induktiv angeregte thermografische Prüfung benötigte Komponenten

Der computergesteuerte Hochfrequenztransformator mit einer Leistung von 5 kW oder mehr und einem Frequenzbereich von 30 kHz bis 1000 kHz erzeugt mit dem Induktor ein wechselndes Magnetfeld. Die Form des Induktors hängt hierbei von der jeweiligen zu prüfenden Geometrie ab. Für die qualitative Auswertung setzt eine leistungsstarke Infrarotkamera mit großen Detektoren voraus. Focal-Plane-Arrays (FPA) mit ca. 300x 300 Pixeln sind zwingend notwendig, wobei die Anzahl stark vom Abbildungsmaßstab abhängt. Bei bewegten Prüfobjekten muss die Kamera zusätzlich eine sehr hohe Bildfrequenz aufweisen. Sinnvoll sind 400 Hz oder mehr. Die Steuereinheit wird neben der Speicherung der Messdaten oft auch zur Auswertung der Messergebnisse genutzt.

### Mögliche detektierbare Fehlerorientierungen

Fehlerarten, die mit der induktiv angeregten Thermografie erkannt werden können, sind in Abbildung 3 gezeigt. Die Fehler sind zum Einen senkrecht zur Objekt Oberfläche lateral und longitudinal im Testobjekt orientierte Risse und zum Anderen parallel zur Oberfläche liegende Fehlstellen, wie beispielsweise Delaminationen.

Risse können zur Oberfläche geöffnet oder verschlossen sein. Jedoch gilt die Voraussetzung für die Detektierbarkeit dieser Defekte, dass sie innerhalb der Wirbelstromeindringtiefe liegen.

Flächige Einschlüsse müssen nicht zwingend innerhalb der Wirbelstromeindringtiefe liegen, da nach der Anregung die thermische Welle, ähnlich der

optischen Anregung, durch das Bauteil läuft und die Reflexion an der Oberfläche detektiert werden kann.

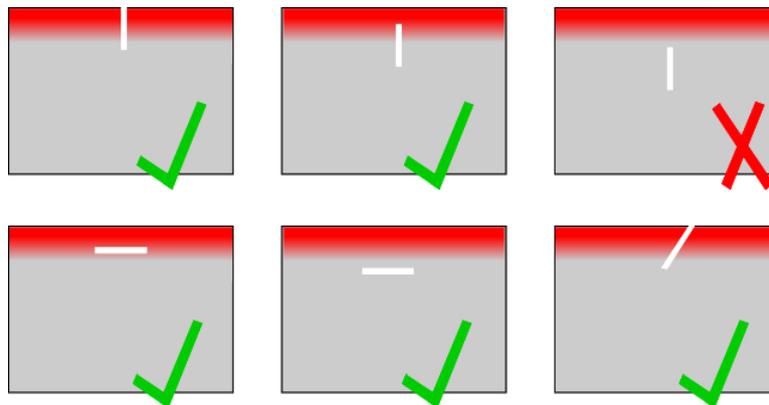


Abbildung 3: Detektierbare Fehlerorientierungen

### Modellierung und Simulation der induktiven Thermografie

Die Simulation der induktiven Thermografie wurde in der ANSYS Entwicklungsumgebung mit der ANSYS Parametric Design Language (APDL) entwickelt. Um den Induktionsvorgang zu simulieren, muss die Simulation eine elektrische, magnetische und thermische Analyse umfassen. Eine coupled-field-simulation bietet hierfür eine einfache Möglichkeit diese Bereiche in einer Multifieldsimulation zu koppeln. Die drei Programmteile wurden hier, wie in Abbildung 4 gezeigt wird, verbunden.

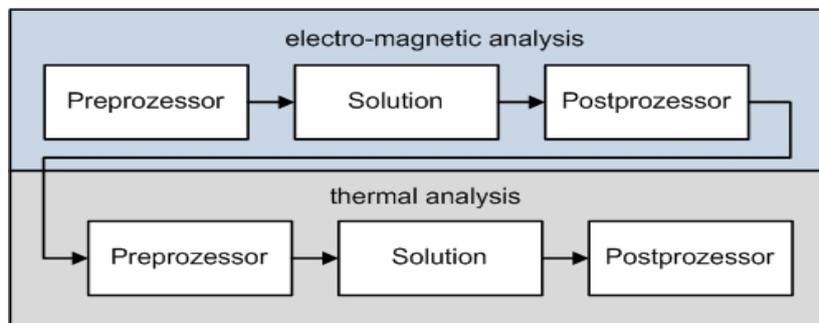
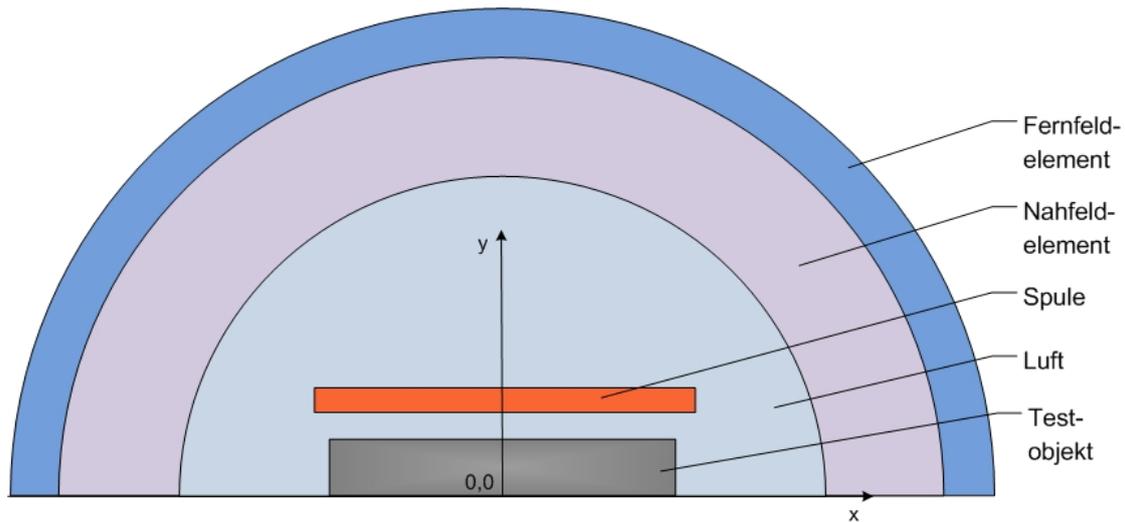


Abbildung 4: Programtablaufplan der Multifieldsimulation

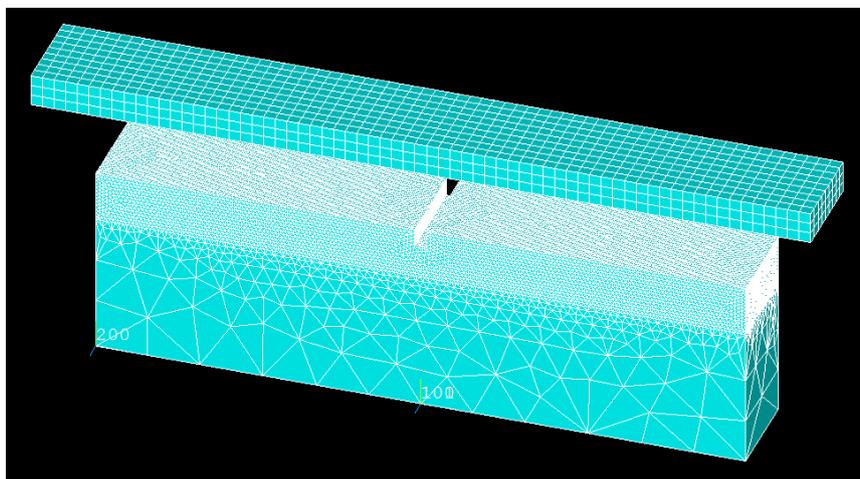
Hinsichtlich der Modellierung wurde das in Abbildung 5 gezeigte Koordinatensystem eingeführt. Die Richtung des Einheitsvektors in z-Richtung zeigt senkrecht aus der Zeichenebene heraus. Hieraus ergibt sich, dass der Strom durch den Induktor in x-Richtung fließt und das daraus resultierende magnetische Feld in z-Richtung orientiert ist. Bei Vorgabe eines Stromes ist somit eine 3-dimensionale Modellierung notwendig.

Eine Reduzierung des Modells auf nur 2 Dimensionen ist möglich, wenn das magnetische Feld als Startparameter vorgegeben wird. Bei der 3-dimensionalen Modellierung kann der Zeit- und Rechenaufwand durch die Betrachtung lediglich einer dünnen Scheibe reduziert werden. Zusätzlich ist es in der Simulation sinnvoll, die bei praktischen Versuchen eingesetzten Induktoren durch eine einfache Geometrie zu ersetzen.



**Abbildung 5:** Modell der Simulation

Auf der Grundlage, dass für die Feldstärke neben der Form lediglich der Induktorstrom und die Anzahl der Windungen ausschlaggebend sind, kann in einem sehr dünnen Modell die Spule auf einen einfachen Leiterzug reduziert werden. In Abbildung 5 ist das vollständige Modell dargestellt. Eine besondere Schwierigkeit bei der Simulation von Wirbelströmen stellt die Notwendigkeit der sehr kleinen Vernetzungsgröße dar. Im Bereich der Wirbelstromeindringtiefe wird eine Netzgröße 3- bis 10-mal kleiner als die Eindringtiefe benötigt. Bei Skintiefen von wenigen Mikrometern erreicht das gesamte Modell bereits schon bei geringen Größen einen sehr großen rechnerischen Umfang mit mehreren Millionen Knoten. Um die Anzahl der Knotenpunkte so gering wie möglich zu halten, wurde das Testobjekt wie in folgender Abbildung vernetzt. Zusätzlich wurde die Ausdehnung des Modells in z-Richtung stark beschränkt.



**Abbildung 6:** Modellierung von Spule und Testobjekt

### **Simulierter Verlauf der Wirbelströme**

Besonderes Augenmerk soll in diesem Artikel auf der qualitativen Betrachtung des thermischen Fingerabdruckes bei der Prüfung von austenitischen Stählen mit senkrecht zur Oberfläche verlaufenden Rissen gelegt werden. Hierfür sind die Verläufe der induzierten Wirbelströme ausschlaggebend. Wie in Abbildung 7 und 8 zu erkennen ist, verlaufen die Wirbelströme in der näheren Umgebung des Risses nicht direkt an der Oberfläche.

Hierdurch entsteht ein Bereich, der näherungsweise überhaupt nicht erwärmt wird. Weiterhin lässt sich hieraus die Vermutung aufstellen, dass die Ausdehnung des nicht angeregten Bereichs direkt von der Risstiefe abhängt. Diese Vermutung soll nachfolgend mit ersten Simulationsergebnissen bestätigt werden.

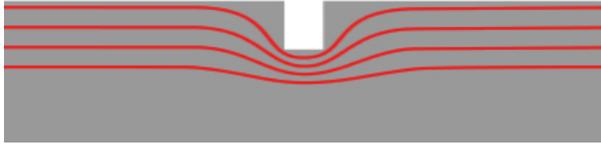


Abbildung 7: Schematische Verteilung des Wirbelstroms in austenitischem Stahl

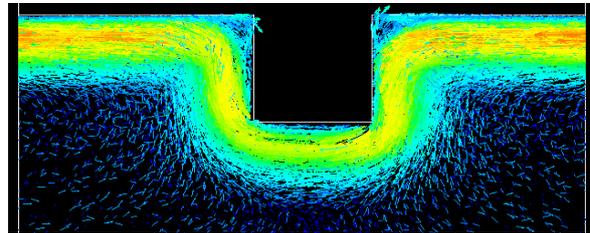


Abbildung 8: Simulation der Wirbelstromverteilung

### Simulierter Temperaturverlauf

Mit Hilfe der realisierten Simulation kann der mittlere Temperaturverlauf an der Bauteiloberfläche angegeben werden. Dieser ist in Abbildung 9 dargestellt.

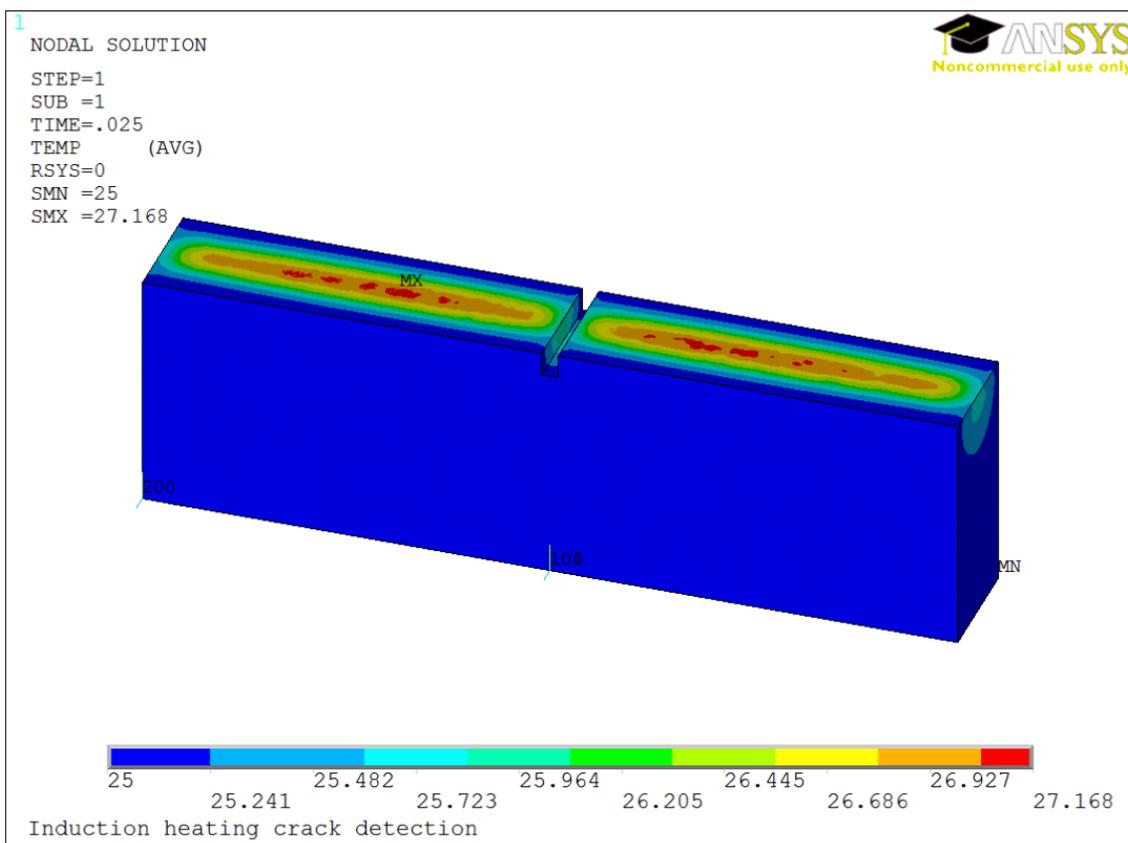
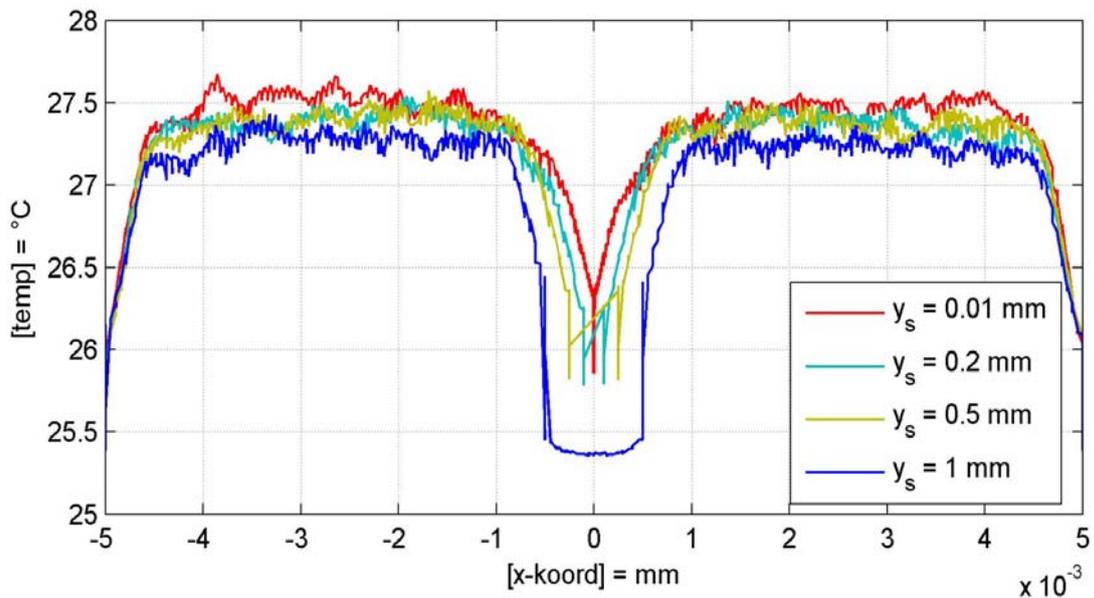


Abbildung 9: Simulierter mittlerer Temperaturverlauf (Anregungsfrequenz:  $f=10$  kHz)

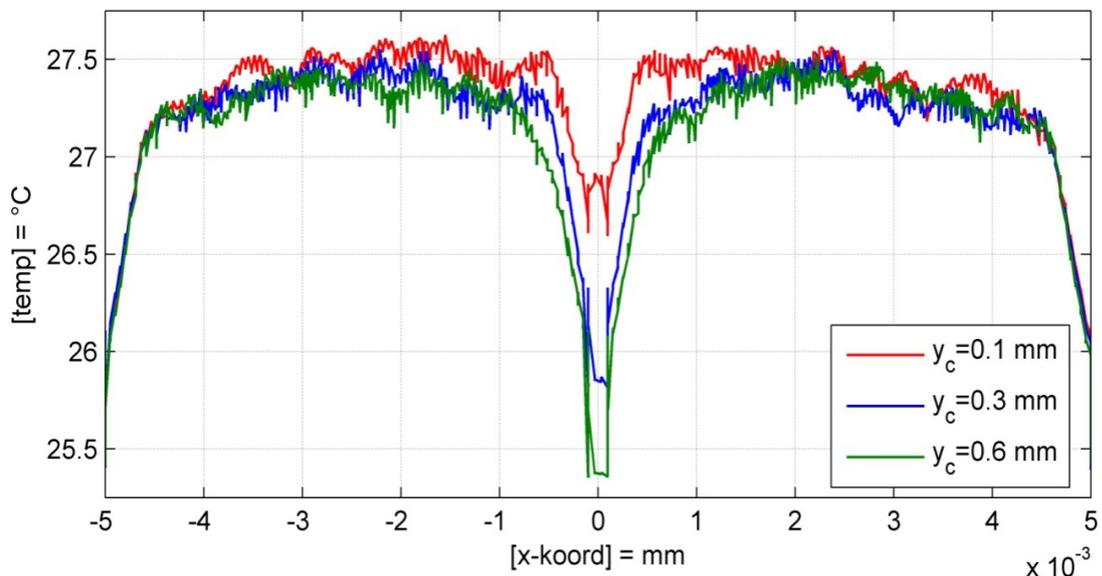
Wie gefordert zeigen die Simulationen eine sehr starke Abhängigkeit von der Anregungsfrequenz. Bei der weiteren Untersuchung der Temperaturverteilung in Abhängigkeit der Rissgröße wurde folglich die Anregungsfrequenz konstant gehalten. Die folgenden Ergebnisse zeigen eine eindeutige Abhängigkeit von der Risstiefe bzw. der

Rissbreite. In Abbildung 10 sind die simulierten Verläufe der Temperatur entlang der Oberfläche aufgetragen.



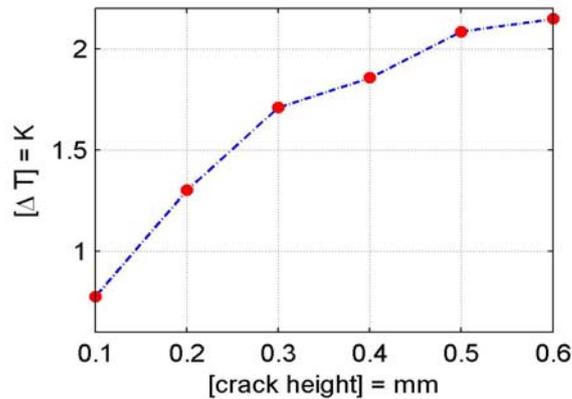
**Abbildung 10:** Oberflächentemperatur an unterschiedlich breiten Rissen (Höhe=konstant)

Es ist zu erkennen, dass die Breite des Risses einen direkten Einfluss auf den Temperaturverlauf hat. Zusätzlich ist aus Abbildung 10 ersichtlich, dass es an den Rissflanken eine Abhängigkeit von der Risstiefe gibt. In Abbildung 11 ist die Oberflächentemperatur bei verschiedenen Risstiefen und konstanter Breite aufgetragen.



**Abbildung 11:** Oberflächentemperatur an unterschiedlich hohen Rissen (Breite=konstant)

Ein erster Ansatz zur Bestimmung der Risstiefe ergibt sich über die Temperaturdifferenz zwischen fehlerfreier Oberfläche und der Temperatur im Riss. Die Differenzen von verschiedenen Modellen sind in Abbildung 12 aufgetragen.



**Abbildung 12:** Temperaturdifferenz zwischen Riss und Oberfläche bei verschiedenen Risshöhen

Ein weiterer Ansatz zur Bestimmung der Risstiefe stellt die Ermittlung des Temperaturgradienten dar. Der Einflussbereich des Risses auf die Temperaturverteilung in der direkten Umgebung vergrößert sich mit zunehmender Tiefe. Der Gradient ist somit bei großen Risstiefen geringer als bei kleinen Rissen.

## Zusammenfassung und Diskussion

Bislang wird die induktiv angeregte Thermografie lediglich zur örtlichen Bestimmung der Fehlerposition genutzt. Dieser Artikel zeigt erstmals, wie Thermogramme hinsichtlich einer genaueren Aussage über die Fehlergeometrie herangezogen werden können. Bei dieser Arbeit lag die Identifizierung eines Mechanismus zur Bestimmung der Risstiefe im Vordergrund. Der für die Risstiefenbestimmung ausschlaggebende Effekt ist der Skineffekt, nach dem Wirbelströme aus einem elektrisch leitenden Material zur Oberfläche hin verdrängt werden. Die induzierten Wirbelströme können sich somit nur in einer dünnen Schicht innerhalb der Skintiefe an der Oberfläche ausbreiten. Risse in der Oberfläche beeinflussen die homogene Ausbreitung der Wirbelströme, was wiederum die Temperaturverteilung in der Umgebung des Risses an der Bauteiloberfläche beeinflusst.

Es wurde eine Simulation zur Berechnung der Temperaturverläufe in der direkten Umgebung des Risses entwickelt. Diese Simulation stellt die Grundlage für weitere Betrachtungen hinsichtlich der Bestimmung der Risstiefe dar. Ausgangsmaterial für die Simulation und die anschließenden Betrachtungen stellte ein nicht ferritischer metallischer Werkstoff dar. Die Untersuchungen konnten eindeutige Abhängigkeiten von der Rissbreite und der Risstiefe belegen. Weiterhin wurden erste Ansätze zur reproduzierbaren Bestimmung der Risstiefe vorgestellt.

In einem weiteren Schritt werden diese Ergebnisse mit realen Messungen verglichen.

## Referenzen

- [1] Xavier P. V. Maldague, „Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing“, John Wiley & Sons, 9. Mai 2001
- [2] M. Noethen, K. J. Wolter, N. Meyendorf “Surface Crack Detection in Ferritic and Austenitic Steel Components”, IEEE, 2010
- [3] Roman Przylucki, “Calculations of the induction heating system with the monitoring of thermal stress in the charge”, leonardo-energy 2008
- [4] M.H. Tavakoli “Computational modeling of induction heating process”, Progress in Electromagnetics Research Letter, Vol. 11, 93-102, 2009
- [5] M. Vollmer, K. Möllmann, “Infrared Thermal Imaging“, Wiley-VCH, 2010